

## Procesos y dinámica costera en Ensenada de Marbella: evolución morfosedimentaria reciente.

### *Processes and coastal dynamics in the Ensenada de Marbella: recent morphosedimentary evolution.*

E. Guisado-Pintado<sup>1</sup>, G. Malvárez<sup>2</sup> y J. Ojeda Zújar<sup>3</sup>

1: Coastal Environments Research Group. Área de Geografía Física. Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla. CP 41013; [esguipin@upo.es](mailto:esguipin@upo.es)

2: Área de Geografía Física. Universidad Pablo de Olavide, de Sevilla. CP 41013; [gcmalgar@upo.es](mailto:gcmalgar@upo.es)

3: Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla. CP 41004; [zujar@us.es](mailto:zujar@us.es)

**Resumen:** La Ensenada de Marbella ha experimentado en las últimas décadas cambios físicos y socio-económicos sustanciales debidos fundamentalmente a una transformación en el modelo económico y un desarrollo acusado del turismo residencial y todos los impactos en los usos del suelo relacionado con ello. Sin embargo, las causas de la alteración de la dinámica litoral también hay que buscarlas en cambios en la morfología del nearshore y en la dinámica sedimentaria. Para analizar la morfodinámica de la ensenada en varios escenarios temporales, simulaciones de oleaje sobre batimetrías del 1888 y actuales revelan cambios importantes en los patrones dispersión de la energía y el funcionamiento de la bahía a través de complejas células litorales de transporte. El análisis de los procesos dinámicos en la zona del nearshore y el estudio volumétrico a través de modelos de batimetrías secuenciales muestran como dichos cambios morfológicos de los fondos costeros pueden o no estar relacionados con cambios a largo plazo en la línea de costa, y por tanto ser co-responsables de los procesos de erosión y acreción acelerados evidentes a lo largo de la Ensenada.

**Palabras clave:** morfodinámica, células litorales, nearshore, disipación de energía.

**Abstract:** *The Ensenada of Marbella has experienced in the past decades significant physical and socio-economic changes mainly due to a deep transformation in the economic model and a strong development of the tourism industries. Associated land use change has induced evident transformations on the coastline. However it is in the nearshore that severe alterations need to be investigated via wave propagation simulations performed on 1889's and contemporary bathymetries to reveal important changes in wave energy dissipation patterns and in the overall functioning of the Bay through the development of complex littoral cells. The analysis of nearshore processes and volumetric analyses by the comparison of time lapsed bathymetries show how these changes in the seafloor, occurred at a century scale, could be linked with the shoreline evolution in the long-term, and thus explain in part the erosion and accretion patterns detected in the Ensenada.*

**Key words:** *morphodynamics, littoral cells, nearshore, wave energy dissipation, Ensenada de Marbella.*

## ANTECEDENTES

Son numerosos los estudios que se han centrado en la identificación de las fuerzas responsables de los cambios en la costa, particularmente asociados a procesos de erosión/acreción. En este sentido, el rol de la batimetría, ha sido reconocido como responsable de los cambios en la costa (Munk y Taylor, 1947), pero son pocos los estudios que han analizado la influencia de la variación natural en la batimetría como responsable de los cambios en la costa (Carter et al., 1982; Cooper y Navas, 2004).

La Costa del Sol, fuertemente alterada por cambios en los usos del suelo, presenta una hidrodinámica variable así como diversas fuentes de sedimentos lo que hace que el estudio morfosedimentario y el reconocimiento de células litorales de transporte sea

complejo. Por este, y otros motivos, el estudio de las consecuencias que las variaciones en las fuentes de sedimentos (fuertemente alteradas) tienen en la morfodinámica de la Ensenada, así como la identificación de potenciales células litorales como últimos responsables del transporte y deposición, son de gran interés. Estudios previos (Guisado et al., 2013) muestran la complejidad e importancia de los eventos de alta energía, especialmente del E, en dicha costa como mecanismo de activación de una potencial célula de transporte en dirección W-E y responsable de un extenso sistema dunar, hoy reducido a las dunas de Cabopino.

En este trabajo, el análisis se basa en la comparación volumétrica y morfosedimentaria de los datos batimétricos de finales del siglo XIX y de principios del XXI y en el estudio hidrodinámico de los procesos costeros para entender la evolución de la Ensenada de Marbella.

### La Ensenada de Marbella

Se extiende desde Punta de Baños (Estepona) hasta Punta Calaburras (en el municipio de Marbella) con más de 65 km. El desarrollo de infraestructuras que tuvo lugar durante los 60s y el incremento poblacional dieron lugar a una profunda transformación del paisaje costero con impactos irreversibles como la alteración de los aportes sedimentarios en la mayoría de las playas (Malvárez et al., 2003). La Ensenada presenta una orientación WSW-ENE que cambia a W-E en el entorno de Marbella. Los sistemas de playas no presentan desarrollo dunar, a excepción del complejo de Cabopino al E de la Ensenada. Se trata de un manto dunar fósil, aún activo en algunas zonas, y que ha experimentado un receso en las últimas décadas. La red fluvial formada por los ríos Gualdalmina, Guadaiza y Verde al W, los Arroyos de las Piedras y de la Cañada en el entorno del núcleo urbano de Marbella, así como el río Real y el arroyo de las Siete revueltas al E, entre otros, desempeñaban antaño un papel fundamental en la dinámica litoral siendo su principal fuente de aportes. Sin embargo, actualmente la fuerte intervención llevada a cabo en los cauces y en la cuenca (presas) han disminuido su funcionalidad como fuente de sedimentos, estando actualmente la dinámica costera controlada por agentes marinos. Este hecho unido a un rango micromareal con mareas que raramente exceden el metro de carrera, hacen que el principal agente hidrodinámico en la zona sea el oleaje. El régimen de oleaje se caracteriza por largos periodos de calmas (77% del año) en los que la altura de las olas es menor de 1 m y el periodo corto (T: 4-5 segundos) lo que se corresponden con olas de tipo *sea* generadas por vientos locales y limitado *fetch*. La dirección de aproximación del oleaje y el viento se caracteriza por una alternancia de casi 50% del W y E.

### MÉTODOS

#### Tasas volumétricas: de 1888 a 2010

A partir del plano levantado con motivo de la construcción del Fondeadero de Marbella, en 1888 a escala 1:10000 (IECA, 2013), se georreferencia y se digitalizan las cotas batimétricas (681 puntos con resolución decimal) desde 0 m hasta la isobata de -60, incluyendo posición de la línea de costa. Se construye un modelo MDE con una resolución de 23 m (pixel) de la Ensenada que permite la comparación con los datos del modelo batimétrico existente del 2010 (CMA, 2013) a 40 m, que se remuestrea a 23 m y se recorta conforme a la batimetría del S. XIX para proporcionar homogeneidad al análisis comparativo. El resultado son dos modelos batimétricos de igual extensión y tamaño de celdilla de 23 m, con valores batimétricos con un decimal de precisión. Ambos modelos son restados para detectar los cambios producidos en la batimetría entre ambos periodos, y detectar las posibles pérdidas o ganancias, es decir los sumideros y fuentes. El error cuadrático medio en el ajuste geométrico de ambos modelos es de 17,2 para la cartografía de 1888. Los

errores altimétricos ligados al proceso de interpolación y rasterización de la información altimétrica de esta misma fecha fue inferior a 0.15 m. Para calcular los cambios topobatimétricos en el periodo de estudio se ha efectuado una diferencia entre los MDEs de cada fecha, de manera que se obtenga una representación de las áreas de erosión y acumulación en la totalidad del sistema.

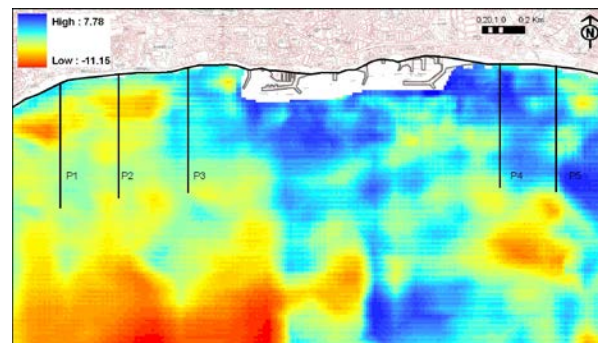


FIGURA 1. Cambios topobatimétricos en la Ensenada de Marbella entre 1888 y 2010.

#### Balance sedimentario

Mediante el cálculo volumétrico de las variaciones en la superficie del fondo del mar entre ambos periodos se pretende estimar, tanto los cambios parciales en la distribución de sedimentos por acción del oleaje, como los cambios totales ocurridos, posibles salidas o pérdidas, en el sistema. En zonas de transformación directa por obras de infraestructuras (puertos y espigones), éstas y las zonas aledañas se eliminan del cálculo volumétrico para evitar errores.

#### Análisis de oleaje

Las tormentas son los agentes más importantes en la modelización y evolución de la Ensenada (Guisado et al., 2013) ya que activan procesos y mecanismos de transporte ausentes en condiciones modales. La localización de Marbella entre Punta Calaburras y Punta de Baños hace que la circulación litoral funcione como una célula semicerrada. Se simulan usando SWAN (Booij et al., 1996) condiciones modales y de alta energía del E (Hs: 3 m T: 7 s) y del W (Hs: 2,77 m, T: 7,0 s) basadas en los datos reales de la Boya de Alborán, con objeto estudiar la dispersión de la energía y las corrientes inducidas por el oleaje en la Ensenada. Conjuntamente se estudian 5 perfiles cross-shore situados al W del actual puerto (P1, P2, P3) y al E (P4 y P5). A lo largo de estos perfiles se analizan los cambios altimétricos (tasas volumétricas) y la forma de disipación de energía en el S. XIX y en el S. XXI.

### RESULTADOS

Los resultados muestran como la línea de costa apenas ha variado mientras que los cambios en el nearshore y, sobre todo, en profundidades intermedias (-14 hasta -30) son bastantes acusados. La Figura 1 muestra como el rango de cambio en la batimetría es de

entre +7,78 y -11,15 m, para toda el área estudiada. Las zonas de pérdida de sedimentos significativas con respecto a 1888 se localizan en todo el flanco occidental de la Ensenada, algunas en el entorno del P1 y P2 (-5 m de pérdida entre la cota de 7 y 9 m) y otras a profundidades mayores de los 30 m (pérdidas de -10 m); y en menor medida una pequeña zona al final del P3 y P4 (pérdida de -5 m, cota de 30 m), coincidente con la existencia de una zona de ondas de arena. Al contrario ocurre en el flanco E del área de estudio donde se aprecia una ganancia neta de sedimentos con valores que rondan los +4-5m (cota de 10-15 m) en la zona central y offshore del actual puerto (cota de -40 m) y de entre + 3-5 m (desde la cota de -8 hasta -15 m) en la zona más oriental. Por su parte, los cálculos volumétricos arrojan un balance negativo de -260.854 m<sup>3</sup>/año ( $\pm 0,1$ ), lo cual concuerda con la disminución de aportes de las cuencas vertientes y con el retroceso del sistema duna de Cabopino que se encuentra en el límite E del sistema. Estos cambios además podrían estar afectando la forma de dispersión del oleaje relacionada con la morfología del fondo tal y como se muestra en la figura 3.

El análisis de eventos de alta energía en la zona parece ser más complejo de lo previsto, ya que tanto las tormentas de levante tal y como demostró Guisado et al., 2013, como aquellas de componente W favorecen una circulación y potencial transporte W-E que parece finalizar en Cabopino. Más específicamente, los cambios que se producen en la velocidad orbital entre ambas fechas parecen estar condicionados por los cambios en las batimetrías. La velocidad orbital significativa (0,5-2,5 m/s), ligada al posible transporte de sedimentos se extiende hasta la cota de -14 m en toda la Ensenada, aunque se aprecia una basculación de dicha cota hacia el W lo que hace que encontremos dichas velocidades en puntos más lejanos a la costa en dicho flanco, donde además se localizan las áreas de erosión (Figura 3). En la zona del E de la bahía (1888), la velocidad orbital parece alcanzar su máximo entorno a un posible banco de arena localizado entorno a los -3 m, el cual ha desaparecido en el 2010. Los cambios en la batimetría se ven reflejados en la forma de dispersión de la energía del oleaje (Figura 2), en general todos los perfiles asociados al S. XIX se caracterizan por una disipación continua, un perfil suave, ocurriendo el pico máximo entre 1.5-4 m (0,015 W/m<sup>2</sup>). En el 2010, la cantidad de energía disipada es mayor (0,26 W/m<sup>2</sup>) y la forma de disipación presenta un pico de máxima disipación que ocurre más cerca de la costa con respecto a la batimetría del 1888 (sobre todo en P1, P3, P4). Esta situación se invierte en P5 con un perfil de disipación más suavizado (que genere rompientes tipo *spilling*) con el máximo a unos -4 m. Esto parece estar indicando que los cambios inducidos en la batimetría al W de la Bahía están provocando un cambio en el estado morfodinámico de las playas y en definitiva en los procesos derivados del oleaje.

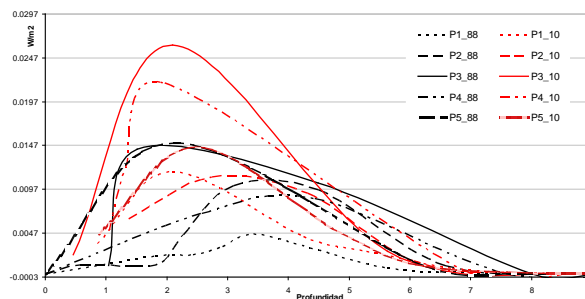


FIGURA 2. Perfiles de disipación de energía en ambos escenarios batimétricos.

## DISCUSIÓN

La potencial relación entre los cambios ocurridos en la batimetría y los cambios observados en las morfologías costeras son investigados en diferentes condiciones hidrodinámicas para modelos batimétricos de 1888 y 2010. En el último siglo los cambios acontecidos en el perfil topobatimétrico de la Ensenada parecen ser el reflejo de alteraciones en la zona emergida (cambio usos del suelo, regulación de cauces, etc.). La pérdida de aporte por parte de los ríos, junto con una aparente circulación W-E en condiciones de oleaje alta energía, indistintamente de la procedencia de éstas, parecen ser los principales responsables de la erosión sufrida en la zona occidental y la ganancia relativa en la oriental. En condiciones de alta energía, las velocidades orbitales significativas se extienden hasta profundidades medias poniendo la célula litoral en movimiento; incluso en profundidades superiores a la *teórica* profundidad de cierre, calculada para ambientes de baja energía como la Costa del Sol, en torno a 8 m. Los depósitos de arena existentes en el S. XIX (situados a partir de la cota de 17 m, y otros más someros) parecen estar sujetos a la circulación que se origina en eventos de alta energía y que actúa a profundidades de hasta 30 m induciendo una corriente paralela a la costa y en dirección E. De esta forma, la bahía parece funcionar como un cinturón de transporte desde el W hacia el E, teniendo su destino potencial en las dunas de Cabopino. El aparente transporte neto W-E concuerda bien con el hecho de que la Ensenada recibe la mayoría de sus aportes de los ríos (Guadalmina, Guadaiza y río Verde) situados al oeste de la ensenada donde empieza la célula litoral. De esta forma el balance neto de los últimos 122 años es una ganancia de sedimentos hacia el E y una pérdida en el W debido a que los sistemas fluviales han perdido su capacidad de aporte y por tanto no se “reemplaza” el sedimento en el W, de ahí las pérdidas en profundidades medias y someras. De hecho las dos pérdidas más significativas se localizan en los -8 m y los -30 m, correspondiéndose la primera con la profundidad de cierre en condiciones modales de oleaje), pero debido a la resiliencia de éstos ambientes



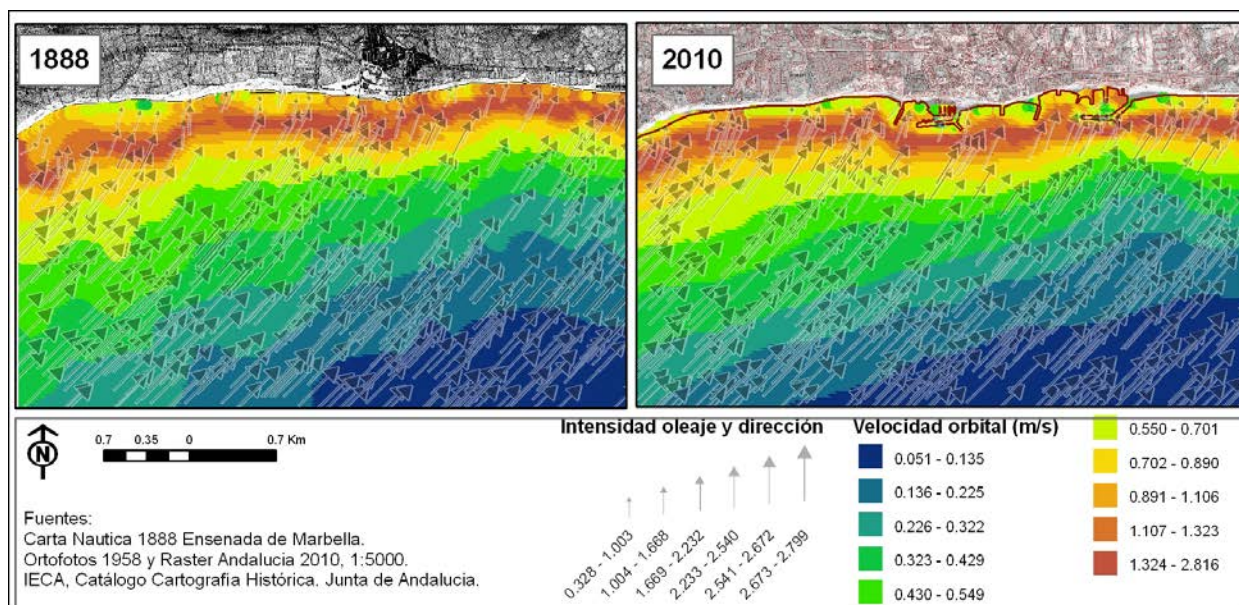


FIGURA 3. Hidrodinámica de la Ensenada en condiciones de alta energía con procedencia de Poniente.

Mediterráneos parece extenderse hasta los -30 m Guisado et al., 2014) en condiciones altamente energéticas como tormentas. Las evidencias de los cambios en la batimetría indican el balance y evolución sedimentaria del sistema en el último siglo con una tendencia a la erosión y pérdida de sedimento. Sin embargo, dichos cambios que ocurren en el nearshore y a profundidades intermedias, no concuerdan con los cambios observados en la línea de costa en el entorno de Marbella, la cual (a excepción de aquellos cambios inducidos por la construcción de que las grandes infraestructuras, dos puertos y varios espigones que se evidencia con la acreción/erosión de ciertas playas). En este sentido, en general no se evidencian grandes cambios en la costa, o al menos no de la magnitud de los volúmenes observados en la batimetría; con la excepción el entorno de Cabopino, que sí parece responder a los cambios ocurridos en el balance sedimentario con una tendencia claramente de pérdida de superficie potencialmente asociada a un reducción del aporte de las cuencas del W y la consecuente disminución de transporte por parte de la célula.

Este fenómeno observado, parece estar indicando que cambios ocurridos a ciertas profundidades no tienen por qué estar relacionados con cambios en la línea de costa, y que este sistema funciona de forma más compleja a la esperada, en la que posiblemente el sistema de Cabopino se mantiene durante episodios de máximo aporte sedimentario que ponen la célula en marcha, que luego por diversos motivos no alcanza las dimensiones necesarias para seguir aportando sedimento al sistema, lo cual además explicaría el hecho de que en la costa adyacente no se evidencien grandes cambios geomorfológicos. Estos resultados pueden tener importantes implicaciones en la gestión costera de estos sistemas ya que las regeneraciones y otras actuaciones han ignorado el importante rol que las células litorales desempeñan en estos ambientes, las

cuales además dependen de la disponibilidad de sedimento y de la energía que recibe el sistema.

## REFERENCIAS

- Booij, N., Holthuijsen, L., y Ris, R. (1996): The SWAN wave model for shallow water. En: 25th *International Conference on Coastal Engineering*; 668-676.
- Cooper, J.A.G y Navas, F. (2004): Natural bathymetric change as a control on century-scale shoreline behaviour. *Geology*, 32 (6): 513-516.
- Carter, R. W.G., Lowry, P. y Stone, G. (1982): Ebb-tidal control of shoreline erosion via wave refraction, Magilligan point, NI. *Marine Geology*, 48: 17-25.
- CMA (2013): Modelo digital de elevaciones topobatemétricas del litoral de Andalucía de resolución 20x20m del Año 2010.
- Guisado, E., Malvárez, G. y Navas, F. (2013): Morphodynamic environments of the Costa del Sol. *Journal of Coastal Research*, SI65: 500-505.
- Guisado-Pintado, E., Malvárez, G., Navas, F. y Carrero, R. (2014): Storms based morphodynamics from wave energy dissipation for beach characterisation. *Journal of Coastal Research*, SI70: 260-265.
- IECA, Instituto Estadístico y Cartográfico de Andalucía, (2013): Plano del Fondateiro de Marbella (D. José Gómez Ímaz- 1888).
- Malvárez, G.C., Pollard, J., y Domínguez, R.I. (2003): The Planning and Practice of Coastal Zone Management in Southern Spain. *Journal of Sustainable Tourism*, 11(2-3): 204-223.
- Munk, W.H. y Taylor, M.A. (1947): Refraction of ocean waves: A process linking underwater topography to beach erosion. *Journal of Geology*, 55: 1-26.